

# 片断化森林的边缘效应与自然保护区的设计管理

渠春梅, 韩兴国, 苏 波

(中国科学院植物研究所, 北京 100093)

**摘要:** 森林片断化引起了森林边缘物理环境与生物的变化。从森林边缘向林内, 光辐射、温度、湿度、风等因素发生改变, 这些反过来对边缘上和边缘附近的生物产生极其重要的影响。有些研究表明, 生物与非生物存在明显的边缘-核心的变化梯度, 而有些则没有。除了影响边缘效应的客观因素(如边缘的取向、地势、年龄等)外, 主观因素对边缘效应也有影响。边缘对生物与非生物的影响因片断化森林的面积、形状以及与其他森林片断连接程度的不同而不同, 故边缘效应的研究对自然保护区的设计管理有一定的指导意义。

**关键词:** 森林片断化; 边缘效应; 保护区设计管理

## Edge effects in fragmented forests: Implications for design and management of natural reserves

QU Chun-Mei, HAN Xing-Guo, SU Bo (Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100093, China)

**Abstract:** Forest fragmentation causes large changes of the physical environment as well as biotic changes in forest edges. As a result, environmental factors such as fluxes of radiation, air temperature, air moisture, soil moisture and wind, vary between the edge and interior in some forest fragments. These in turn can have important influences on the biota at or near the edge. Some research results show significant gradient trends from the edge to the core of fragmentation, while others do not. The orientation, physiognomy and age of forest edges all affect the results; while the subjective reason should not be neglected. The influences of edges on biota and abiota are modified by the size, shape of forest fragments, and the connectivity with other fragments. The study on edge effects of forest fragments is of great significance in the design and management of natural reserves.

**Key words:** forest fragmentation; edge effects; design and management of natural reserves

文章编号: 1000-0933(2000)01-0160-08 中图分类号: Q149, S718.55 文献标识码: A

由于人口膨胀、经济飞速发展等原因, 森林皆伐和连续森林的片断化在世界范围内不断扩大。尤其在热带雨林地区, 其速度之快是前所未有的。某些地区 93% 的自然植被已被毁林开田等土地利用方式所代替<sup>[1]</sup>。热带雨林正在以超过 150 000 km<sup>2</sup>/a 的总量消失, 若将择伐算在内, 是会超过 200 000 km<sup>2</sup>/a, 占全球热带森林总量的 1.2%。假定保护森林的速度不变, 现存热带森林的 1/3 将在未来 30a 间被皆伐或被改作他用。很明显, 在当代人的有生之年, 世界上热带森林很有可能消失殆尽<sup>[2]</sup>。

森林大面积消失, 生境破碎或片断化(fragmentation)成为人类改造自然的最引人注目的后果<sup>[3,4]</sup>, 同时也成为保护生物学几十年来研究的热门课题。生境片断化引起的主要变化之一是暴露在其他生境中的边缘比例增加<sup>[5]</sup>。边缘在片断化景观中占很大的比例, 并且在保留森林中的影响不断扩大<sup>[6]</sup>。当相邻的两

个生态系统被边缘隔离后,它们之间相互作用就产生了边缘效应<sup>[7]</sup>。边缘效应的存在,使森林从内向外产生生态环境梯度,原有的生境质量下降,导致某些生物灭绝,生物多样性明显降低。通过对边缘效应的研究,可以为片断化森林生态系统的管理、恢复以及生物多样性的保护提供科学的依据。

近年来,国外生态学家对森林片断化后的边缘效应作了非常广泛的研究<sup>[1,5,7]</sup>。相比之下,国内的相关研究则处于起步阶段。目前为止,只有极少数人对片断化热带雨林小气候的边缘效应作过研究<sup>[8]</sup>,仍有大量工作需要去完成。另外,人们对这一领域的了解也相对较少。有鉴于此,本文拟对近十多年来国内外片断化森林边缘效应的研究结果加以总结,并且对自然保护区的设计管理策略进行讨论。

## 1 片断化森林的边缘效应

### 1.1 边缘效应的类型与表示方法

Murcia<sup>[7]</sup>将边缘效应比较详细地划分为三类:(1)非生物效应,包括来源于不同结构基质的自然环境条件的变化,如养分循环和能量平衡<sup>[9]</sup>以及小气候沿着边缘的变化等<sup>[10,11]</sup>;(2)直接生物效应,包括由于边缘附近自然环境的改变而直接引起的物种分布和多度的改变;(3)间接生物效应,这种效应来源于边缘或边缘附近的物种间相互作用的改变。例如捕食,竞争,生物传粉,种子扩散等;同时,还与某些种群遗传学结构的改变也有关<sup>[12]</sup>。而大多数研究者只将其粗略地分为生物与非生物效应。

起初,人们用片断化森林的周长与面积比  $p/a$  来表示边缘效应<sup>[13~15]</sup>。后来,为了计算特定面积或形状的片断中未受边缘影响的核心面积, $p/a$  被核心面积模型所代替。该模型用从林缘开始,进入林内的距离  $d$  来表示。边缘效应即随进入林内距离的改变而改变,并且受边缘所处地势和方位的影响<sup>[7]</sup>。

### 1.2 片断化森林边缘的非生物与生物效应

生境片断化后,森林边缘生境中许多物理、化学和生物等因子都发生了一系列的显著变化。突出表现在森林边缘的小气候以及植物、动物和微生物等会沿林缘-林内的梯度发生不同程度的变化,从而也导致片断化森林生态系统边缘的养分循环过程发生改变。

#### 1.2.1 非生物的边缘效应

森林片断化后,边缘暴露在农田、牧场等与原来生境差异很大的基质中,其能量平衡与自然植被完全覆盖的景观明显不同。主要表现为:到达地面的太阳辐射增加,白天温度升高,相对湿度降低<sup>[16,17]</sup>,地表反射率改变,夜间地表热辐射增加,地表及土壤表层的温度日较差变大<sup>[1]</sup>。相对黑暗、潮湿、阴凉的小环境不复存在,边缘小气候正在由“凉湿效应”向“干暖效应”转化<sup>[18]</sup>。

风的干扰是热带地区一个重要的生态过程。首先,森林片断化后,森林边缘暴露。一方面,原本生长于封闭林内的植物,从未经受过大风的侵袭,缺乏承受大风的必要支撑结构,因此风速增加会直接或间接地导致植物机械损伤,抑制生长,使冠层覆盖度下降,增加大树倒掉的机率<sup>[10,19]</sup>;另一方面,需光或适应风干抗的次生植被被过度增加,林缘有被快速生长的次生植被封闭的趋势,从而使植被结构最终发生改变。研究发现,风对片断化森林结构的破坏作用可以从林缘延伸至林内几百米。这说明,即使是很大的森林片断( $>1000\text{hm}^2$ ),也会受到风的严重干扰<sup>[20]</sup>。其次,风速在边缘的提高,会产生增加诸如粉尘、种子等物质从周围基质向片断化森林边缘传播的次级效应。同时,昆虫、细菌、微生物向片断内的传播也增加,从而对剩余斑块产生难以估量的潜在影响<sup>[1]</sup>。最后,风还能够促进林缘附近林窗的形成。Kapos<sup>[21]</sup>在林缘年龄约 5a 的片断中发现,在从林缘至林内 60m 的范围内,林窗占调查样地总面积的 90%,而在对对照样地中仅占 14%,并且越向林内林窗所占比例越少。

一些研究者还通过测定空气温度、土壤湿度、蒸汽压差(vapor pressure deficit)、光合有效辐射(PAR)、空气中  $\text{CO}_2$  浓度等参数研究了边缘效应<sup>[5,11,18,21~23]</sup>。有些研究已得出普遍性结论,即边缘对小气候的影响可从林缘延伸至林内 15~60m 处<sup>[8,24,25]</sup>。但在一些研究中,却没发现明显的小气候梯度<sup>[10,11]</sup>。因为在所有可能的情况下,不同的边缘有不同的相互作用,并且作用也未必单一。此外,边缘的年龄也是边缘效应的影响因素<sup>[5]</sup>。

影响物旁数据最主要的因素是方位(orientation)和地势(physiognomy)。方位决定了太阳辐射量,太阳辐射量小则边缘效应弱<sup>[10]</sup>。但是,由于赤道附近的太阳磁偏角在一年中从北向南移动,因此方位对太

阳入射角和日照长度的影响不断变化,从而对边缘效应的影响也随着变化。11~翌年2月份,太阳在南磁偏角,北向边缘受环境的影响较小;而5~7月,太阳在北磁偏角,结果则相反。地势则通过影响照到林下层的入射光来影响边缘效应<sup>[7]</sup>。

### 1.2.2 生物的边缘效应

**1.2.2.1 植物的边缘效应** 由边缘引起的物理环境的改变,可直接影响森林结构,即便边缘已产生了几十年。边缘的产生会使光照增加,从而促进植物的生长<sup>[26]</sup>。研究发现,在多种热带及温带森林中,树干密度和基部面积在林缘20m范围内大于林内,并且有繁殖力的植物所占比例随着进入林内距离的增加而显著降低<sup>[24,27,28]</sup>。森林植物的生物量、生产力对边缘效应有明显响应<sup>[27]</sup>。物理环境还可以通过引起植物死亡来改变近缘森林的结构,例如大风或火灾等,进而加快原来树木死亡的速率<sup>[10]</sup>,同时支持了适应新环境的特有种的存在<sup>[29]</sup>。

林缘环境因子的改变同样会影响林缘的物种组成。新产生的林缘部分冠层消失,透射入林缘的侧光增多,红光/远红光比增大<sup>[30]</sup>,强光使林缘原有的植物物种被迫适应已骤然改变了的环境。例如,有些耐荫种的幼苗叶片被灼烧后,生长量减少,光饱和点降低<sup>[31,32]</sup>。由于不同物种的生理忍耐度不同,因此对非生物环境的不同功能反应决定了它们能否继续在林缘成功存在,一些物种在林缘密度减少或消失,另一些则增加或不发生改变。而在有些研究中,却发现物种组成没发生变化<sup>[26]</sup>。

随着边缘年龄的增长,貌似平静的边缘却在悄悄地发生变化。有的物种侵入已变化了的边缘生境,改变了边缘物种的组成。有人发现<sup>[33]</sup>,热带雨林片断化导致藤本植物和其它次生植被在边缘10~25m的狭长条带内生长迅速,这会有效封闭片断化边缘,以在片断化森林内部维持与以前相似的环境。调查结果表明,隔离5a比隔离1a的森林片断内部要明显阴暗潮湿的多。结果导致先锋种后退,相对多度和个体增补率降低,死亡率升高,而耐荫种反之。这种现象在某种程度上也发生在温带地区。

片断化已很久的景观内部的物种组成和边缘的物种组成显著不同。例如,雨林种在保护区内部最为丰富,先锋种的物种丰富度在边缘有一峰值,而杂草的丰富度在边缘外有一峰值,需光种则分布广泛。边缘效应与过去的干扰史显著相关,干扰水平是决定植被组成的关键因素。若干扰增加,则边缘宽度增加,杂草和先锋种的密度和物种丰富度增加,耐荫雨林种的密度和物种丰富度降低<sup>[34]</sup>。

片断化景观中周围无森林地带经常由外来种控制,因为几乎没有当地物种能忍受皆伐地的彻底暴露。外来种有侵入边缘的趋势。干扰越大,越利于其侵入。外来种的大量涌入甚至能推翻小片断内原来的群落结构<sup>[35]</sup>。

边缘的产生还会影响土壤种子库的变化。边缘光线的增加,足以促使光敏种子萌发。尽管土壤种子库中,光敏种子在边缘产生之前就非常丰富,但是其幼苗在边缘分布却不多,部分原因是边缘土壤所受的干扰通常不发生在边缘产生时。新边缘植物的主要来源是边缘产生前的幼苗、幼树。而干扰后发展起来的植被的结构和组成部分依赖于土壤种子库中的次生物种<sup>[36]</sup>。因此,土壤干扰是某些物种种子萌发的重要动力<sup>[37]</sup>。

**1.2.2.2 动物的边缘效应** 动物,尤其是脊椎动物,是片断化研究的普遍对象。因为许多动物种对生境变化反应迅速,如鸟和哺乳动物。许多较小的物种亦对小尺度生境结构和森林小气候敏感,对边缘效应和其他生态环境改变亦反应强烈,如两栖动物中的蛙。另外,动物的研究也为生境保护提供了宝贵的本底资料。

森林的边缘对某些野生动物具有积极效应,但是对其他野生动物却存在负面影响。最近研究发现,森林片断内原有的动物种对边缘的响应各不相同,动物在边缘的密度、活动也大相径庭。有的对边缘趋之若鹜。Paton<sup>[38]</sup>总结边缘效应得出结论:捕食和寄生率经常在边缘向内50m显著增大,而且捕食率与生境片断化程度呈正相关<sup>[39]</sup>。有人在美国马里兰和田纳西的松树林以及哥斯达黎加的低地雨林的 research 中也发现,鸟类中的巢穴捕食和巢穴寄生在边缘和边缘附近出现的频率高于林内<sup>[40]</sup>;昆虫的多度和多样性经常在近边缘处增加<sup>[41,42]</sup>。有的则对边缘惟恐避之不及。有些动物,例如对边缘干燥特别敏感的北昆士兰森林中的蜈蚣,是成功回避者,它们经常在由边缘向林内50~100m的范围内不常见,而是逃入了潮湿的片断化森林内部<sup>[42]</sup>。

此外,周围基质中的动物物种对边缘的反应可导致片断内物种组成的改变。Brown 和 Hutching<sup>[41]</sup>发现,蝴蝶是森林干扰的最好指示者,喜光蝴蝶能够从外围基质进入林内至少 250m,从而成为片断内新的物种组成。在适宜的环境下,动物还能使植物通过生物和非生物媒体向边缘扩散,可以使物种从周围基质向边缘集聚,甚至进入片断内一段距离。例如,昆士兰热带雨林中的动物,通过采食、粪便、皮毛携带等途径,可将种子从生产地带入片断内约 80m<sup>[43]</sup>。

除了动植物存在较强的边缘效应外,土壤微生物受片断化森林边缘的影响也较大。森林片断化以后,边缘土壤湿度升高,保湿能力下降,透气性增强,造成土壤微生物的物种构成、数量及活性发生变化,从而使凋落物分解速度改变,养分循环过程也因此而受到很大的影响<sup>[1]</sup>。

1.3 边缘效应研究结果多样化的原因分析

尽管研究者已对有着不同边缘特性、被不同基质包围的不同林型进行了大量研究,但是,却仍不能清晰地总结出边缘效应的一般模式。这至少有 3 个原因:(1)试验设计欠妥;(2)方法缺乏一致性;(3)对边缘和边缘效应的感知过于简单化<sup>[7]</sup>。此外,片断的年龄,所处地势,方位,周围基质的类型等许多因素是边缘效应强度的潜在调节因素。

生物与非生物之间的相互作用,使得希望所有的边缘效应都千篇一律随着距边缘距离的变化而单调增减的理想状态无法实现。甚至有几个研究发现,在边缘和边缘的内部一段距离都有边缘效应的高峰。Murcia 假设了边缘效应的双峰模型模式,她认为这是两个或多个生物或非生物因子相互作用的结果。Didham<sup>[42]</sup>的认识则更进一步,他认为,林内某位置形成边缘内部的生态交错带,在边界两边物种重叠,产生了高的物种丰富度和多度,这一观点揭示了发生在边缘内部交错面上的某些动态过程。

总之,对研究地点、边缘的确定标准等描述的不足,显示出研究者对影响边缘效应因素的重要性了解不够深入;同样,试图在所有生态水平上寻求简单的、静态的模式是天真而不切实际的<sup>[7]</sup>。

2 边缘效应与自然保护区的设计管理

Curtis 的研究最早向人们发出了森林景观片断化能够导致物种灭绝的警告<sup>[44~46]</sup>,而 Bergess 和 Sharpe 和著作可以说比较系统和全面的总结了该领域的早期研究成果<sup>[47]</sup>。这些早期的研究成果为 Harris<sup>[48]</sup>能够更加全面和深入地探讨片断化生境中生物多样性的动态、物种之间的相互作用和基于岛屿生物地理学理论<sup>[49]</sup>的自然保护区的设计问题奠定了基础。研究证明,边缘效应同另外一些因素(如:生物活动区域大小、栖息地异质性的消失、次级灭绝等)都会影响到生物种群的灭绝<sup>[33]</sup>。为了更好地保护森林片断内的遗传多样性、物种多样性以及生态系统多样性,科学设计自然保护区已经变得非常重要。

2.1 保护区面积

保护区面积是设计自然保护区时需要考虑的一个重要因素。一般而言,大的保护区有较大的核心区,受到与边缘有关的生物、非生物的影响相对较小,因此能保护更多的物种和生态系统,其中的生物种群灭绝的可能性就较小;反之,如果保护区面积较小,它受外部因素的影响就较大,而生物种群灭绝的可能性就要大得多。研究表明,10 个 10hm<sup>2</sup> 的保护区,对某些入侵能力强的生物物种来说,每一个保护区都可能是边缘;而对一个 100hm<sup>2</sup> 的保护区而言,则其内部可能还有一小块尚未受到边缘影响的核心区,所以,保持生态系统中有代表性的物种组成和物种多样性所需的最小临界面积或许可能仅存在于大保护区内<sup>[50]</sup>。

一些物种,特别是大型脊椎动物,在小的保护区内容易灭绝<sup>[51]</sup>。最新研究发现,在被隔离的小保护区内,生存领域大的大型肉食动物比生存领域小的更容易灭绝,这说明小保护区强烈的边缘效应是该种群灭绝的主要原因。因此,那些仅旨在抵制随机过程的保护措施不可能避免灭绝,作为替代,人们更应该将尽可能扩大保护区面积或者尽量减轻肉食动物在林缘及缓冲区所受到的危害作为保护重点<sup>[52]</sup>。

总之,从边缘效应的角度出发,本文认为一个大保护区比几个小保护区好,这同大多数研究者的观点相符合<sup>[53]</sup>。但是,由于小片断包含了大保护区所没有的边缘生境,因此对于野生动物占优势的小片断来说,并不意味着小片断没有保护价值<sup>[54]</sup>。

2.2 保护区形状数据

保护区的形状决定了周长与面积(或边缘与内部)的比例。狭长的保护区比方形或圆形的保护区有更



多的边缘,更易受到边缘的伤害<sup>[55]</sup>。研究证明,保护区的形状以圆形为最佳。Game<sup>[56]</sup>的理由是圆形保护区可将动植物向内部传播的距离降至最低。此外,周长与面积比即  $p/a$  比越小,在一定程度上边缘的影响越小。在所有的形状中,圆形的  $p/a$  比最小,故可使森林边缘和森林内部的比例降至最低。同样的道理,森林内部不应允许林地的皆伐。若不得已而为之,皆伐的林地也应尽可能靠近森林边缘,进行边缘合并。

### 2.3 缓冲区与生境走廊

边缘效应的存在对原来生境中的生物有不良影响,对某些野生动物尤其如此。例如,当地居民在热带雨林中的狩猎行为,通常要从森林边缘进入林内若干公里,这对有些野生动物种群存在很大的破坏作用。因此,有必要在保护区周围建立生存缓冲区。缓冲区应足够宽,应将边缘效应可能影响到的距离都包括在内<sup>[42]</sup>。

Noss<sup>[57]</sup>等将保护区内部分为 3 部分:1)用于保护基因和物种多样性的核心区;2)位于核心区周围的缓冲区;3)试验区。核心区是原生生态系统和物种保存最完好的地段;缓冲区一方面防止对核心区的影响和破坏,另一方面可进行某些试验性和生产性的科学研究。在缓冲区周围还要划出相当面积的试验区<sup>[51]</sup>。

尽管生境廊道本身的价值尚存在争论,但它却使保护区之间或与其他隔离生境的重新组连变成现实<sup>[58]</sup>。大保护区间的生境廊道是核心区的扩展,其宽度包含了适宜生境,并且廊道的最佳宽度与保护目标种的区域大小相关<sup>[51]</sup>。

Noss<sup>[57]</sup>在不同的时空尺度上提出了野生动物廊道的 3 种类型:(1)在不尺度上,连接两个紧密相连的生境斑块的廊道。这样的廊道仅适宜于边缘种,而不利内部种。(2)在景观镶嵌尺度上,建立更长、更宽的连接主要景观因子的廊道,使保护区内部种和边缘种作昼夜或季节性的或永久的移动。(3)连接各区域的自然保护区网。保护区网包括核心保护区、生境廊道和缓冲区,其中,内缓冲区需严格保护,外缓冲区允许人类活动。一个真正的保护区网应包括多个保护区<sup>[51]</sup>。

### 2.4 保护区的经营管理

从长远的观点看,几乎所有的保护区都需要主动的经营管理,以防止片断化或片断化后人为活动所产生的生态失衡。片断化森林生态系统的管理有两个基本方面:(1)对自然生态系统的内部管理;(2)对自然生态系统的外部影响的管理。对于大保护区,重点应在于内部动态的管理,例如包括关键物种的干扰机制和种群动态;而对于小保护区管理应主要面向外部影响的管理<sup>[1]</sup>。但有研究表明,不论保护区大小,内外影响都很重要<sup>[59]</sup>。因此,管理者要注重景观整体的管理,以确保保护区管理的目标——长期保持生物物种多样性的实现。

保护区管理者经常面对的是将片断化并作为理想保护区的森林片断,以及已经片断化并需要充分利用的片断化森林生态系统。为此,对保护区的管理者提出以下指导性建议:首先,要确定现存片断的最小亚类群(subset),亚类群是指某一特定地区代表本区多样性的亚群<sup>[60]</sup>,这要求管理者具备一些关于物种分布或生态系统类型的知识;其次,要设法使片断化系统保持物种或生态系统的多样性;再者,必须建立管理的优先权,因为在保护区的管理中有许多问题需要解决,但是在工作中经常面临有限资源的限制,因此必须有清楚的优先顺序以确保资源的最佳利用。最后,由于已经改变的内部动态和外部影响所产生的持续压力的存在,为保护保护区现有的状态,非常需要管理的连续性。

### 3 结语

总之,由边缘驱动的生物和非生物效应不是孤立存在的,而是相互影响、相互制约的。非生物效应是生物效应产生的前提和驱动力,而生物效应则反过来影响非生物效应发生改变。边缘效应最终会通过影响动物、植物和微生物而使片断化森林生态系统的结构(物种构成和生物多样性)与功能(能量流动和物质循环)发生改变,进而使片断化森林的恢复与重建变得极为困难与复杂。因此,要充分了解生物发展的详细自然史,预测生物间的相互作用,最大限度地估计边缘效应的距离,象关心保护区内部一样,密切关注片断化森林周围景观构成的变化,把不该进入林内的物种挡在保护区外。

近十多年来的数据表明,经济发展的需要,我国很多热带、亚热带森林地区(如西双版纳)将大面积原始森林转化成了橡胶林或农田,使生态系统的片断化程度越来越高。热带、亚热带片断化森林生态系统的保护迫

在眉睫。由于国内在边缘效应方面的研究还很少,因此,促进我国主要森林类型的边缘效应以及保护生物学研究,早日赶上世界研究水平,是摆在我国生态学家和保护生物学家面前的一项重要任务。

## 参考文献

- [1] Sunders D A, Hobbs R J and Margules C R. Biological consequences of ecosystem fragmentation: A review. *Conserv. Biol.*, 1991, **5**(1): 18~32.
- [2] Laurance W F and Bierregaard R O Jr. A crisis in the making. In: Laurance W F and Bierregaard R O Jr. eds. *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities*. The University of Chicago Press, London, 1997, xi~xv.
- [3] Hobbs R J. Effects of landscape fragmentation on ecosystem processes in the western Australian wheatbelt. *Biol. Conserv.*, 1993, **64**: 193~201.
- [4] Dooley J L JR. and Bowers M A. Demographic responses to habitat fragmentation: experimental tests at the landscape and patch scale. *Ecology*, 1998, **79**(3): 969~980.
- [5] Kapos V, Wandelli E, Camargo J L, et al. Edge-Related changes in environment and plant responses due to forest fragmentation in Central Amazonia. In: Laurance W F. and Bierregaard R O. Jr. eds. *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities*. The University of Chicago Press, London, 1997, 33~44.
- [6] Chen J, Franklin J F and Spies T A. An empirical model for predicting diurnal air-temperature from edge into old-growth Douglas-fir forest. *Ecological Modeling*. 1993, **67**: 179~198.
- [7] Murcia C. Edge effects in fragmented forests: Implications for conservation. *TREE*. 1995, **10**: 58~62.
- [8] 马友鑫, 刘玉洪, 张克映. 西双版纳热带雨林片断小气候边缘效应的初步研究. *植物生态学报*, 1998, **22**(3): 250~255.
- [9] Reed R A, Johnson-Barnard J and Baker W L. Fragmentation of a forested Rocky Mountain landscape, 1950~1993. *Biol. Conserv.*, 1996, **75**: 267~277.
- [10] Lovejoy T E, Bierregaard R O Jr, Rylands A B, et al. Edge and other effects of isolation on Amazon forest fragments. In: M E Soulé, ed. *Conservation biology: The science of scarcity and diversity*. Sinauer Associates, Sunderland, Mass, 257~285.
- [11] Matlack G R. Microenvironment variation within and among forest edge sites in the eastern United States. *Biol. Conserv.*, 1993, **66**: 185~194.
- [12] Young A G, Merriam H G and Warwick S I. The effects of forest fragmentation on genetic variation in *Acer saccharum* Marsh (sugar maple) populations. *Heredity*. 1993, **71**: 277~289.
- [13] Schonewald-Cox C M and Bayless J W. The boundary model: A geographical analysis of design and conservation of nature reserves. *Biol. Conserv.*, 1986, **38**: 305~322.
- [14] Buecher M. Conservation in insular parks: Simulation models of factors affecting the movement of animals across park boundaries. *Biol. Conserv.*, 1987, **41**: 57~76.
- [15] Stamps J A, Buecher M and Krishnan V V. The effect of edge permeability and habitat geometry on emigration from patches of habitat. *American Naturalist*. 1987, **129**: 533~552.
- [16] Brown N. The implications of climate and gap microclimate for seedling growth conditions in a Bornean lowland rain forest. *J. Trop. Ecol.*, 1993, **9**: 153~168.
- [17] Malcolm J R. Edge effects in Central Amazonian forest fragments. *Ecology*. 1994, **75**: 2438~2445.
- [18] 许再富, 朱 华, 刘宏茂, 等. 滇南片断热带雨林植物物种多样性变化趋势. *植物资源与环境*, 1994, **3**(2): 9~15.
- [19] Laurance W F. Edge effects in tropical forest fragments: Application of a model for the design of nature reserves. *Biol. Conserv.*, 1991, **57**: 205~219.
- [20] Laurance W F. Hyper-disturbed parks: edge effects and the ecology of isolated rainforest reserves in Tropical Australia. In: Laurance W F. and Bierregaard R O. Jr. eds. *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities*. The University of Chicago Press, London, 1997, 71~84.
- [21] Kapos V, Ganade G, Matsui E, et al.  $\delta^{13}\text{C}$  as an indicator of edge effects in tropical rainforest reserves. *J. Ecol.*, 1993, **81**: 425~532.
- [22] Young A G, and Hell N. Microclimate and vegetation edge effects in a fragmented podocarp-broadleaf forest in New Zealand. *Biol. Conserv.*, 1994, **67**: 63~72.

- [23] Camargo J L, Cand Kapos V. Complex edge effects on soil moisture and microclimate in Central Amazonian forest. *J. Trop. Ecol.*, 1995, **11**: 205~211.
- [24] William-Linera G. Vegetation structure and environmental conditions of forest edges in Panama. *J. Ecol.*, 1990, **78**: 356~373.
- [25] Stephen M T and Freiburger H J. Edge and aspect effects on the microclimate of a small tropical forest remnant on the Atherton Tableland, Northern Australia. In: Laurance W F. and Bierregaard R O. Jr. eds. *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities*. The University of Chicago Press, London, 1997, 45~54.
- [26] Chen J, Franklin J F and Spies T A. Vegetation responses to edge environments in old-growth Douglas-fir forests. *Ecol. Appl.*, 1992, **2**: 387~396.
- [27] Palik B J and Murphy P G. Disturbance versus edge effects in sugar-maple/beech forest fragments. *For. Ecol. Manage.* 1990, **32**: 187~202.
- [28] Rose S. Influence of suburban edges on invasion of *Pittosporum undulatum* into the bushland of northern Sydney, Australia. *Aust. J. Ecol.*, 1997, **22**: 89~99.
- [29] Brokaw N. Fragments past, present and future. *TREE*. 1998, **13**: 382~383.
- [30] Orozco-Segovia A and Vazquez-Yanes. Light effect on seed germination in *Piper* L. *Acta Oecol.*, 1989, **10**: 123~146.
- [31] Chazdon R L. Light variation and carbon gain in rain forest understory palms. *J. Ecol.*, 1986, **74**: 995~1012.
- [32] Oliveira-Filho A T, Mello J M and Scolforo J R S. Effects of past disturbance and edges on tree community structure and dynamics within a fragment of tropical semideciduous forest in south-eastern Brazil over a five-year period (1987-1992). *Plant Ecology*, 1997, **131**: 45~66.
- [33] Turner I M. Species loss in fragments of tropical rain forest: a review of the evidence. *J. Appl. Ecol.*, 1996, **33**: 200~209.
- [34] Fox B J, Taylor J E and Fox M D, *et al* Vegetation changes across edges of rainforest remnants. *Biol. Conserv.*, 1997, **82**: 1~13.
- [35] Simberloff D. Species-area relationships, fragmentation, and extinction in tropical forests. *Malayan Nature Journal*, 1992, **45**: 398~413.
- [36] Enright N. Existence of a soil seed bank under rainforest in New Guinea. *Aust. J. Ecol.*, 1985, **10**: 67~71.
- [37] William-Lonera G. Origin and early development of forest edge vegetation in Panama. *Biotropica*, 1990, **22**(3): 235~241.
- [38] Paton P W. The effect of edge on avian nest success: how strong is the evidence? *Conserv. Biol.*, 1994, **8**: 17~26.
- [39] Hartley M J and Hunter M L JR. A meta-analysis of forest cover, edge effects, and artificial nest predation rates. *Conserv. Biol.*, 1998, **12**: 465~469.
- [40] Gibbs J P. Avian nest predation in tropical wet forest: An experimental study. *Oikos*, 1991, **60**: 1551~1561.
- [41] Brown K S Jr. and Hutchings R W. Disturbance, fragmentation, and the dynamics of biodiversity in Amazonian forest butterflies. In: Laurance W F. and Bierregaard R O. Jr. eds. *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities*. The University of Chicago Press, London, 1997, 97~110.
- [42] Didham R K. The influence of edge effects and forest fragmentation on leaf litter invertebrates in Central Amazonia. In: Laurance W F. and Bierregaard R O. Jr. eds. *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities*. University of Chicago Press, London, 1997, 55~70.
- [43] Wilson M F and Crome F H J. Patterns of seed rain at the edge of a tropical Queensland rain forest. *J. Trop. Ecol.*, 1989, **5**: 301~308.
- [44] Curtis, J T. The modification of mid-latitude grasslands and forests by man. In: Thoas W L. ed. *Man's role in changing the face of the earth*. University of Chicago Press, Chicago, 1956, 721~736.
- [45] Curtis, J T. The vegetation of Wisconsin-An ordination of plant communities. University of Wisconsin Press, Madison, 1959, 657.
- [46] Curtis, J T and Gottam G. *Plant ecology workbook*. Burgess, Minneapolis, Minnesota. 1962, 193.
- [47] Bergess R L, Sharpe D M. eds. *Forest island dynamics in man-dominated landscapes*. Springer-Verlag, Berlin: Germany, 1981.
- [48] Harris J. **万方数据** *Fragmented forest: island biogeography theory and the preservation of biotic diversity*. University of Chicago Press, Chicago, 1984.

- [49] McArthur R H, Wilson E O. *The theory of island biogeography*. Princeton University Press, Princeton, N J. 1967.
- [50] Restrepo C, Renjifo L M and Marples P. Frugivorous birds in fragmented neotropical mountane forests: landscape pattern and body mass distribution. In: Laurance W F. and Bierregaard R O. Jr. eds. *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities*. The University of Chicago Press, London, 1997, 171~189.
- [51] 李迪强, 蒋志刚, 王祖望. 自然保护区与国家公园. 见: 蒋志刚、马克平、韩兴国主编. 保护生物学. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1997. 132~147.
- [52] Woodroffe R and Ginsberg J R. Edge effects and the extinction of populations inside protected areas. *Science*. 1998, **280**: 2126~2128.
- [53] Simberloff D and Abele L G. Refuge design and island biogeographic theory: effects of fragmentation. *American Naturalist*, 1982, **120**: 41~50.
- [54] Turner I M and Corlett R T. The conservation value of small, isolated fragments of lowland tropical rain forest. *TREE*. 1996, **11**: 330~333.
- [55] Diamond J M. The island dilemma: lessons of modern biogeographic studies for the design of natural reserves. *Biol. Conserv.*, 1975, **7**: 129~146.
- [56] Game M. Best shapes for nature reserves. *Nature*. 1980, **287**: 630~632.
- [57] Noss R F and Cooperrider A Y. *Saving nature's legacy: Protecting and restoring biodiversity*. Washington D. C. , Island Press, 1994.
- [58] Simberloff D and Cox J. Consequences and costs of conservation corridors. *Conserv. Biol.*, 1987, **1**: 63~71.
- [59] Janzen D H. The future of tropical biology. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1986, **17**: 305~324.
- [60] Margules C R and Stein J L. Patterns in the distributions of species and the selection of nature reserves: An examples from Eucalyptus forests in south-eastern New South Wales. *Biol. Conserv.*, 1989, **50**: 219~238.